

法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

グループの行動予測を用いた歩行者シミュレーションの精緻化

著者	伊織 瞳
出版者	法政大学大学院情報科学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．情報科学研究科編
巻	14
ページ	1-6
発行年	2019-03-31
URL	http://doi.org/10.15002/00021934

グループの行動予測を用いた歩行者シミュレーションの精緻化 Refinement of pedestrian simulation using group behavior prediction

伊織 瞳

Hitomi Iori

法政大学大学院情報科学研究科情報科学専攻

E-mail: 17t0006@cis.k.hosei.ac.jp

Abstract

Pedestrian simulation that reproduces dynamics of pedestrian's behaviors in the computer is often used as an effective tool for analyzing and predicting the pedestrian flow on the pavement or in the corridor. The social force model by Helbing can be referred as a representative pedestrian model, although this model is considered to be insufficient to reproduce real world since it does not deal with predicting pedestrians' future states. In this paper, we propose a model that predicts other pedestrians' future states and the optimal walking direction by using simulation. Furthermore, in order to generate more realistic behaviors, we model pedestrian group of two to three people and add virtual force to recognize and get out of the way for the group. Applying this model to the simulation makes the number of pedestrian stopping by others decreasing, compared with the previous model. In addition, we observe stereo-typed group formation and a pattern that could avoid passing through the group center by the power to keep a distance from the group. As a result of reproducing the situation in the real world, we confirm that there is no big difference in the number of pedestrians with sudden speed change between models.

1. まえがき

近年、大規模商業施設やイベント開催の増加によって、大量の人が1箇所に集中する状況が多くなっている。このような状況では人の流れが滞ることや、人の集中による事故を防ぐために、人の流れを予測し、適切な誘導方法が考案されている。この予測のためのツールとして、仮想空間上で様々な環境や歩行者群を再現することができる歩行者シミュレーションが使用されている。

歩行者シミュレーションにて歩行者群の動きを再現するための代表的なモデルとして、Helbingらの提唱する歩行者に働く斥力に基づくモデル[2]が良く知られている。しかしこのモデルでは、他歩行者との距離が近くなってから衝突回避を行うため、他歩行者を回避しきれず長時間不自然に立ち止まる場合がある。この現象を解決するモデルとして、将来の周囲の歩行者の位置を予測と、最適な進行方向の予測の、2段階の予測によって進行方向を決定するモデルを提案する。また、より実世界に近い

状況の再現を可能にするために、グループ歩行者のモデル化を行い、視線ベクトルを利用したグループ認識及び回避を行うモデルを提案する。

2. 関連技術

2.1. Social force モデル

Helbingらの提唱するSocial forceモデルについて説明を行う。Social forceモデルでは歩行者 α の速度変化を3種の力の合力で表す。式(1)に力学的な式を示す。

$$m_\alpha \frac{d\vec{v}_\alpha(t)}{dt} = \vec{f}_\alpha(t) + \sum_{\beta(\neq \alpha)} \vec{f}_{\alpha\beta}(t) + \sum_W \vec{f}_{\alpha W}(t) \quad (1)$$

\vec{f}_α は目的地に望む歩行速度で向かおうとする力、 $\vec{f}_{\alpha\beta}$ は歩行者 α が歩行者 β から受ける力、 $\vec{f}_{\alpha W}$ は歩行者 α が障害物 W から受ける力を表す。 \vec{f}_α は式(2)にて定義する。

$$\vec{f}_\alpha(t) = m_\alpha \frac{v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha - \vec{v}_\alpha}{\tau} \quad (2)$$

式(2)の m_α は歩行者 α の体重、 v_α^0 は望む歩行速度の大きさ、 \vec{e}_α は望む進行方向、 \vec{v}_α は現在の速度を表す。また τ は速度変化の時定数であり、望む歩行速度に近づくまでに要する時間を表す。

$\vec{f}_{\alpha\beta}$ は式(3)(4)(5)にて定義する。

$$\vec{f}_{\alpha\beta}(t) = -\nabla_{d_{\alpha\beta}} V_{\alpha\beta}(b_{\alpha\beta}) + k g(r_{\alpha\beta} - d_{\alpha\beta}) \vec{n}_{\alpha\beta} + \kappa g(r_{\alpha\beta} - d_{\alpha\beta}) \Delta v_{\beta\alpha} \vec{t}_{\alpha\beta} \quad (3)$$

$$V_{\alpha\beta}(b_{\alpha\beta}) = A B \exp(-b_{\alpha\beta}/B) \quad (4)$$

$$2b_{\alpha\beta} = \sqrt{\left(\|\vec{d}_{\alpha\beta}\| + \|\vec{d}_{\alpha\beta} - (\vec{v}_\beta - \vec{v}_\alpha)\Delta t\| \right)^2 - \left\| (\vec{v}_\beta - \vec{v}_\alpha)\Delta t \right\|^2} \quad (5)$$

式(3)の $-\nabla_{d_{\alpha\beta}} V_{\alpha\beta}(b_{\alpha\beta})$ は歩行者から遠ざかりたいと考える心理的な斥力を表している。一方で、2項目と3項目の $k g(r_{\alpha\beta} - d_{\alpha\beta}) \vec{n}_{\alpha\beta}$ と $\kappa g(r_{\alpha\beta} - d_{\alpha\beta}) \Delta v_{\beta\alpha} \vec{t}_{\alpha\beta}$ は物理的な斥力であり、それぞれ人と接触した際の反発力と摩擦力を表す。ここで k 、 κ は力の強さを調整する定数、 $r_{\alpha\beta}$ は歩行者 α と β の身体の半径の和、 $d_{\alpha\beta}$ は歩行者 α と β の距離、 $\Delta v_{\beta\alpha}$ は接線速度差、 $\vec{n}_{\alpha\beta}$ は歩行者 β から歩行者 α の向きに働く単位ベクトル、 $\vec{t}_{\alpha\beta}$ は $\vec{n}_{\alpha\beta}$ と直交する単位ベクトルを

表す． $g(x)$ は身体同士が接触していない際 ($x \leq 0$)は値が 0 となり，接触している際は x となる関数である．式(4)の定数 A , B はそれぞれ他歩行者から受ける影響の強さ，影響を受ける距離を意味する．また式(5)で表される $b_{\alpha\beta}$ は楕円等ポテンシャル線の短半径である． $(\vec{v}_\beta - \vec{v}_\alpha)\Delta t$ は歩行者 α と β の Δt 秒間の歩行の差を表す．このポテンシャルの大きさは 2 人の速度の差に依存する．

また，歩行者 α と障害物 W の間に働く斥力 $\vec{f}_{\alpha W}$ は，障害物を立ち止まっている歩行者であると考え，すなわち $\vec{v}_\beta = \vec{0}$ である歩行者と等しいと考えることにより， $\vec{f}_{\alpha\beta}$ と同様の式で表すことが可能である．

2.2. グループ歩行時のフォーメーション

Moussaïd らはビデオ観察より，2~4 人でのグループ歩行時の速度とフォーメーションについて考察を行った[6]．グループ歩行時の速度は，非グループ歩行時に比べ遅く，グループサイズが大きい程，速度の減少が大きいことが明らかになった．各グループサイズでのフォーメーションは歩行者の密度に依存し，2 人の場合いずれの密度においても横に並ぶ(図 1(a))．3 人かつ低密度の場合，横一列に近いフォーメーションに，高密度の場合，中央に位置するメンバーが端に位置するメンバーよりも後方を歩行するフォーメーションとなる(図 1(b))．4 人の場合も同様に，高密度の場合，中央に位置する 2 人が端に位置するメンバーよりも後方を歩行するフォーメーションとなる(図 1(c))．これらのフォーメーションはグループがコミュニケーションを行いやすい形状であると考えられている．これらの結果より，2 人の場合横一直線に並ぶ状態，3 人の場合グループ中心に近い場所に位置する歩行者が後方に位置する状態を理想的なフォーメーションとして取り扱う．なお，Moussaïd らの研究より 4 人グループでの歩行者は 5%にも満たないことが分かっているため，本論文では 2 または 3 人グループのみモデル化を行う．また歩行速度は，グループサイズが大きい程低下する状態を理想とする．

3. 2 段階予測による歩行者移動モデル

3.1. 1 段階目の予測シミュレーション

各歩行者は次ステップでの移動先を，周囲の歩行者の位置予測と，予測に基づく最適な進行方向予測の 2 段階の予測によって決定する[3][4]．

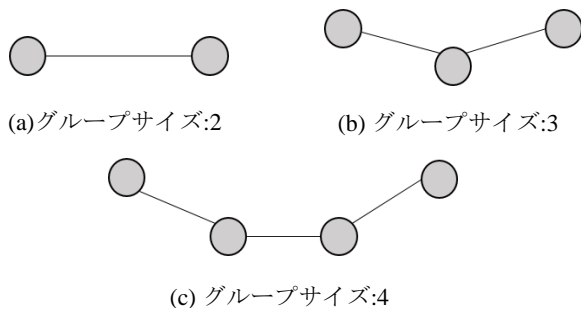


図 1 理想的なグループフォーメーション

まず 1 段階目のシミュレーションにおいて， $t + s$ 秒後の歩行者 α の位置 $\vec{r}_\alpha(t + s)$ と歩行者 β の位置 $\vec{r}_\beta(t + s)$ を求める．ここで 2 種類の予測方法を提案する．

詳細な位置予測モデル: 2.1 節にて示した Social force モデルを使用し， $k = t$ 秒から s' 秒ごとに位置と速度を更新し， $k = t + s$ 秒での全歩行者の位置と速度を求める． $k + s'$ 秒での位置 $\vec{r}_\alpha(k + s')$ と速度 $\vec{v}_\alpha(k + s')$ は，それぞれ式(6)(7)にて与えられる

$$\vec{r}_\alpha(k + s') = \vec{r}_\alpha(k) + \frac{1}{2} \frac{d\vec{v}_\alpha(k)}{dk} s'^2 + \vec{v}_\alpha(k) s' \quad (6)$$

$$\vec{v}_\alpha(k + s') = \vec{v}_\alpha(k) + \frac{d\vec{v}_\alpha(k)}{dk} s' \quad (7)$$

この計算を繰り返すことにより， $k = t + s$ 秒での全歩行者の位置と速度を算出する．本論文では， $s' = 0.25$ 秒とする．求めた歩行者の位置を，各歩行者が現在の状態から予測した将来の他歩行者の状態とする．

簡単な位置予測モデル: 詳細な位置予測を行う 1 段階目のシミュレーションでは， s' 秒ごとに他歩行者の影響を考慮し，位置と速度の更新を行った．しかし，実際に人間が予測を行う際には，相手の位置を概算で簡単に予測している場合も存在することが考えられる．以上より，1 段階目の予測に関する 2 種類目のモデルとして，現在の速度を s 秒後まで維持すると仮定し， s 秒後の位置を求める簡単な位置予測を行うモデルを提案する．

簡単な位置予測モデルでの $t + s$ 秒後の歩行者 α の位置 $\vec{r}_\alpha(t + s)$ と速度 $\vec{v}_\alpha(t + s)$ は式(8)(9)にて定義する．

$$\vec{r}_\alpha(t + s) = \vec{r}_\alpha(t) + \vec{v}_\alpha(t) s \quad (8)$$

$$\vec{v}_\alpha(t + s) = \vec{v}_\alpha(t) \quad (9)$$

この計算により求めた歩行者の位置を，各歩行者が現在の状態から予測した将来の他歩行者の状態とする．各歩行者は他歩行者や障害物の存在に関係なく直線的に進行する．そのため，歩行者同士が接触している等，予測された位置が現実的ではない場合もあるが，それらの現象も含めておおよその予測を行った結果として取り扱う．

3.2. 2 段階目の予測シミュレーション

2 段階目にて複数の経路候補を設定し，先ほど求めた $k = t + s$ 秒の状態における各経路の進行可能な距離を，式(1)を用いたシミュレーションにて求める．まず，視覚情報領域を設定し，領域内の他歩行者の有無を確認する．領域は半径 5m の円とする．式(10)を満たし対向者が存在しない場合，回避行動は不要であるとみなし，目的地の方向と望む進行方向 \vec{e}_α を一致させる．以降，目的地に向かう方向を前方と呼ぶ．式(10)中の $\text{dist}(x_1, x_2)$ は x_1 と x_2 の距離を求める関数とする．

$$\forall \beta: \text{dist}(\vec{r}_\alpha(t + s), \vec{r}_\beta(t + s)) > 5.0\text{m} \rightarrow \vec{e}_\alpha = (\text{前方}) \quad (10)$$

式(11)を満たし視覚情報領域内に対向者が存在する場合，対向者との衝突を回避することが可能な方向を探索する．望む進行方向候補として \vec{e}_{ah} に前方，前方から右に

30°, 前方から右に45°, 前方から左に30°, 前方から左に45°の5方向を設定する。

$$\begin{aligned} \exists \beta: \text{dist}(\vec{r}_\alpha(t+s), \vec{r}_\beta(t+s)) &\leq 5.0\text{m} \\ \rightarrow \vec{e}_{ah} = & \quad \quad \quad (11) \\ & [(前方), (前方から右に30^\circ), \\ & (前方から右に45^\circ), (前方から左に30^\circ), \\ & (前方から左に45^\circ)] \quad (h = 1, \dots, 5) \end{aligned}$$

進行方向候補 \vec{e}_{ah} に対して歩行者 α の位置 $\vec{r}_{ah}(t+s)$ を計算する。1段階目の詳細な位置予測と同様に、 $k' = t$ 秒から s' 秒ごとに位置と速度を更新し、 $k' = t + s$ 秒での全歩行者の位置と速度を求める。 k' 秒での歩行者 α の速度変化は式(1)にて与える。この際、各項での計算に必要な値には、歩行者 α は k' 秒での位置 $\vec{r}_{ah}(k')$ と速度 $\vec{v}_{ah}(k')$ を、歩行者 β は $k = t + s$ 秒での位置 $\vec{r}_\beta(t+s)$ と速度 $\vec{v}_\beta(t+s)$ を用いる。

全ての進行方向候補での位置 $\vec{r}_{ah}(t+s)$ を計算し、式(12)に示す通り、位置 $\vec{r}_{ah}(t+s)$ が最も目的地に近い方向を望む進行方向 \vec{e}_α に設定する。

$$h' = \arg \min_{h=1, \dots, 5} (\text{dist}(\text{目的地}, \vec{r}_{ah}(t+s))) \quad (12)$$

$$\vec{e}_\alpha = \vec{e}_{ah'}$$

進行方向を決定した後、Social force モデルを用いて全歩行者は移動先を決定する。

4. グループのモデル化と回避

4.1. グループ化

実世界では多くの歩行者がグループを組み歩行している。そのため、一般的な状況の再現を可能にするため、グループメンバー間に働く力の定義を行い、グループを表現する。

2.2節にて、グループの歩行速度は非グループ歩行者に比べ遅いと述べた。従って、グループ後方への引力が働いていると考える。また、グループの中心に位置するメンバーが端に位置するメンバーの後方を歩行していることより、端に位置するメンバー程、引力が弱いと考える。この考えより、式(13)(14)にてグループ間に働く力を定義する。

$$\vec{f}_g(t) = \vec{r}_{g'\alpha} \cos(\theta) \quad (13)$$

$$\cos(\theta) = \frac{\vec{v}_g}{\|\vec{v}_g\|} \cdot \frac{-\vec{r}_{g'\alpha}}{\|\vec{r}_{g'\alpha}\|} \quad (14)$$

\vec{g}'_α はグループ中心の位置ベクトルを \vec{g}_c とした際、中心よりグループの平均速度 \vec{v}_g 後方の位置ベクトル、 $\vec{g}'_\alpha = \vec{g}_c - \vec{v}_g$ を表す。また、 $\vec{r}_{g'\alpha}$ はグループメンバー α の位置 \vec{r}_α から \vec{g}'_α へのベクトルを表す。式(14)の $\cos(\theta)$ はグループ後方へのベクトル $\vec{r}_{g'\alpha}$ とグループ後方からグループ中心へのベクトルのなす角を表す。従って、グループの端に位置する歩行者がグループ中心から離れる程 $\cos(\theta)$ 値が

小さくなり、グループ後方への引力が弱まる。この \vec{f}_g を式(1)に追加する。

4.2. グループ認識と回避

4.2.1. 概要

実世界において、歩行者は他グループの中心をなるべく通行しないよう歩行していると考えられる。そのため、グループ歩行者を回避する行動を取り入れる。しかし、人間が歩行時に取得している他歩行者の情報は、位置、速度、顔の向き等限られたものであり、実際にどの歩行者がグループを組んでいるのかという情報は保持していないと考える。そのため、シミュレーションにおいても事前にグループの情報を歩行者に与えるのではなく、グループの認識を行い、回避行動をする手法を提案する。

4.2.2. グループ認識と回避モデル

画像処理で用いられるグループ認識の特徴[1]と検証結果から、以下の条件を満たす歩行者同士を同一グループとして認識する。

1. 歩行者同士の距離が一定以下である
2. 歩行者同士の視線が交差している
3. 歩行者同士の視線ベクトルのなす角が一定の範囲内である
4. 歩行者同士の速度差が一定以下である

まず、認識に用いるために各歩行者の視線を、式(15)にて定義する。

$$\vec{H} = \begin{cases} \frac{\vec{v}_\alpha}{\|\vec{v}_\alpha\|} & (\text{if not group}) \\ \frac{\vec{g}_c + \vec{v}_g}{\|\vec{g}_c + \vec{v}_g\|} & (\text{if group}) \end{cases} \quad (15)$$

グループ歩行者でない場合は速度方向を、グループ歩行者である場合はグループ中心よりグループ平均速度分前方方向を視線方向とする。式(15)にて定義した視線が交差しているかつ、歩行者同士の距離が閾値 d_g 以下かつ、歩行者同士の視線ベクトルのなす角が閾値 d_h 以上であるかつ、速度が閾値 d_v 以下である歩行者を同一グループとして認識する。本論文では $d_g = 1.5\text{m}$ 、 $10^\circ \leq d_h \leq 90^\circ$ 、 $d_v = 0.05\text{m/s}$ とする。この手法では、グループではないが歩行者間の距離が近く、視線が交差している歩行者もグループであると認識されてしまう。しかし、実世界でも正しくグループを認識しているとは限らないこと、グループでなくても近い動きをしている集団を避ける現象が存在することから、誤認識も許容する。認識されたグループの中心 \vec{g}_c より式(3)(4)(5)にて定義を行った心理的な斥力 $\vec{f}_r = -\nabla_{d_{agc}} AB \exp(-b_{agc}/B)$ を発生させる。ここで、 \vec{d}_{agc} は歩行者 α とグループ中心 \vec{g}_c の距離ベクトルを表す。式(5)の計算に必要な速度には、歩行者 α の速度 \vec{v}_α とグループの平均速度 \vec{v}_g を使用する。 \vec{f}_g と同様に、式(1)に心理的な斥力 \vec{f}_r を追加する。

式(1)'にグループ化とグループ回避を含めた力を示す。

$$m_a \frac{d\vec{v}_a(t)}{dt} = \vec{f}_a(t) + \sum_{\beta(\neq a)} \vec{f}_{a\beta}(t) + \sum_W \vec{f}_{aW}(t) + \vec{f}_g(t) + \vec{f}_r(t) \quad (1),$$

式(1)'を用いて $k = t + s$ 秒での全歩行者の位置予測と最適な進行方向の決定、並びに移動先の決定を行う。

5. 実験

5.1. 単独歩行者における比較実験

全ての歩行者が単独で歩行している状況において、位置予測を行わない従来の移動モデルと、1段階目にて詳細な位置予測を行うモデル、簡単な位置予測を行うモデルの計3種のモデルを比較する。従来モデルには2.1節で示した Social force モデルを使用する。幅 20m, 長さ 30m の通路を、上下2つの入り口から15人ずつ進入させ、反対側の進入口に向かって歩行させる。ある歩行者が目的地に到達するまでに、何秒間同じ対向者との距離が 5m 以下となっていたかを調査する。全員が目的地に到達するまでを1回の実行とし、実行を繰り返すことによって1000人分のデータを取得する。各パラメータの値には先行研究[5]にて良いと示された値を使用し、 $\tau = 0.5s$, $v_a^0 = 1.0m/s$, 初速度 $\vec{v}_0 = \vec{0}$, $\lambda = 0.1$, $k = 1.2 \times 10^3 kgs^{-2}$, $\kappa = 2.4 \times 10^5 kgm^{-1} s^{-1}$ とする。また、定数 A, B , 半径 r , 体重 m は $A = 18.66N$, $B = 0.69m$, $r = [0.15m, 0.25m]$, $m = 60kg$ を用いる。

図2に、それぞれのモデルにおいて同じ対向者との距離が5m以下となっていた時間の最大値と人数の関係を示す。従来モデルでは同じ歩行者と対面した時間が3秒以下の歩行者が約1割となった。一方で、提案モデルではいずれの予測方法でも約6割の歩行者の対面時間が3秒以下となっている。望む歩行速度 v_a^0 を1.0m/sとしており、対向者間の相対速度は2.0m/sとなる。距離が5m以下となった歩行者を調査しているため、スムーズにすれ違いが終了した場合、 $5/2.0 = 2.5$ 秒で対向者とのすれ違いが終了する。そのため、3秒以上の対面時間があつた歩行者をスムーズにすれ違いが出来なかった者とする、従来モデルでは、ほとんどの歩行者がスムーズに歩行できていないことが分かる。また、最長の対面時間が従来モデルでは44秒であることに比べ、提案モデルでは簡単な

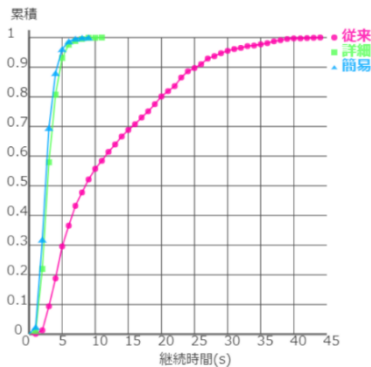


図2 従来モデルと提案モデルにおける対面時間

予測モデルで9秒、詳細な予測モデルで11秒となっていた。これらの結果から、提案モデルでも立ち止まる歩行者は存在するが、従来モデルのように長時間立ち止まる歩行者は存在しないことが分かった。

5.2. グループフォーメーションの検討

提案したグループ化モデルが、2.2節にて定義した理想的なグループ歩行の状態を表現可能かどうかを確認する。幅 12m, 長さ 30m の通路を、上下2つの入口から10人ずつ進入させ、反対側の進入口に向かって歩行させる。20人の内2人あるいは3人をグループ歩行者とする。グループ歩行者の初期位置は、メンバー全員が横一列に並ぶ状態とする。図3にシミュレーションの様子を示す。各パラメータの値は5.1節と同様のものを用いる。

図4(a)(b)にグループサイズが2と3の場合における、グループ歩行者の長さ方向における位置と、時間の関係を示す。グループサイズが2の場合、16秒程まではグループメンバーの長さ方向の位置に差が無く、横に並んでいる状況であることが分かる。また16秒以降は対向者とのすれ違いが発生し、位置に差が出ていと考えられる。その後目的地付近にて再び差がなくなり、2人のグループ歩行者が横に並ぶ状況に戻っている様子が分かる。グループサイズが3の場合、20秒程まではメンバーの内2人の位置に差が無く、ある1人は2人に比べ後方を歩行している様子が分かる。グループサイズ2の場合と同様に対向者とのすれ違い3人の位置に差が出ていたが、34秒程には位置に差がなくなり、歩行開始時と等しく1人が後方を歩く位置に変わっている。実際に歩行の様子を観察したところ、グループ中心に位置する歩行者が端に位置する歩行者よりも後方を歩行しており、理想的なグループフォーメーションを取っていることを確認した。

表1に各グループサイズでの平均歩行速度を示す。グループサイズが大きい程平均速度が小さくなっており、2.2節にて示した理想的なグループ歩行と等しい状態となっていることを確認した。

5.3. グループ回避

グループ認識と回避を行う場合と、行わない場合の行動を観察する。等速直線運動を行う2人グループと、モデルを適用した歩行者1人がすれ違う状況での、モデル適用者の周囲0.7m + 直径内に存在する歩行者数を観察す

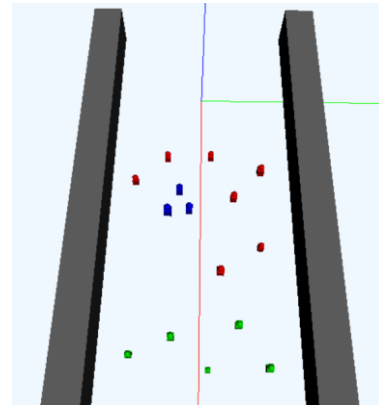
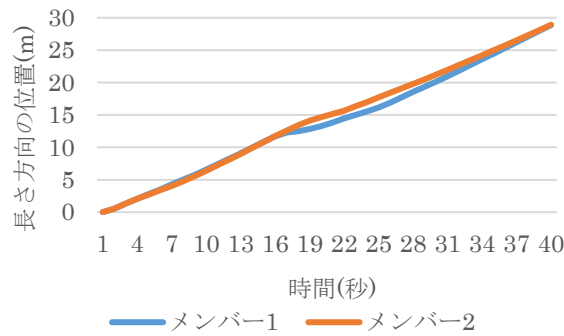
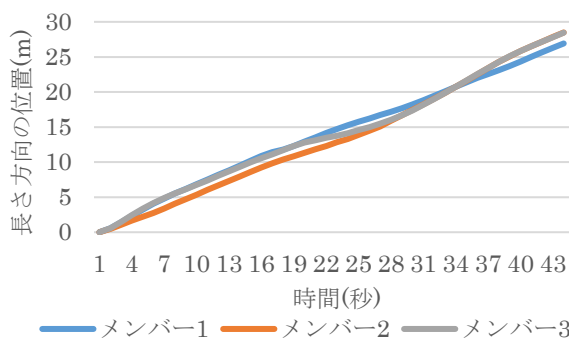


図3 直線通路歩行時の様子



(a)グループサイズ:2



(b)グループサイズ:3

図4 各グループサイズにおける通路の長さ方向の位置と時間の関係

る．グループ中心の座標を(0m,0m)，グループメンバーの座標を(±0.7m,0m)とした際，モデルを適用した歩行者は初期位置(0m,10m),(0.4m,10m)からグループ方向へ進行する．モデルは詳細な位置予測モデルを使用する．パラメータ半径 $r = 0.25\text{m}$ とし，他パラメータは5.1節と同様のものを用いる．

表2にグループ認識を行う場合と行わない場合での，各初期位置における最大の周囲の人数を示す．モデル適用者の x 座標が0mの場合，グループ認識を行わない場合と行う場合で違いが現れず，周囲の人数は最大で2人であった． x 座標が0.4mの場合，グループ認識を行わない場合は最大人数が2名，行う場合は1名となった．これは，認識を行わなかった場合はグループメンバーの間を通っていることを示しており，認識によってグループ内の通り抜けの回避が可能になったと考えられる．

5.4. 実際の状況の再現とグループ認識

CRESTによって提供されているデータ[7]を使用し，大阪府にあるATCショッピングモールの一部を再現する．モデル適用者を歩行させ，グループ認識がどの程度正しく行われているか調査する．約500人が目的地に到達するまでのグループでない歩行者をグループとして認識した誤認識率と，グループの歩行者をグループでない，または本来とは異なるグループであると認識した誤拒否率を調べる．実験環境は図5のように幅約5m×

表1 各グループサイズにおける平均歩行速度

groupSize	平均速度
1人	0.905 m/s
2人	0.738 m/s
3人	0.647 m/s

表2 各初期位置とモデルにおける周囲の最大人数

初期位置	認識無し	認識有り
(0m,10m)	2人	2人
(0.4m,10m)	2人	1人

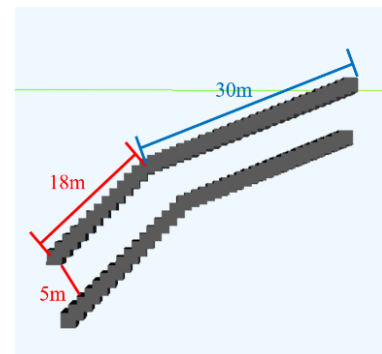


図5 ATCショッピングモール実験環境

表3 急激な速度変化が発生した歩行者の割合

モデル	速度変化が発生した割合
従来モデル	33.7%
簡単な位置予測モデル	31.1%
詳細な位置予測モデル	31.0%
実データ解析結果	20.0%

長さ約18mの通路と幅約5m×長さ約30mの通路が接続した環境である．実際の歩行データを分析した結果より，通路の両端から約1.3秒ごとに歩行者を発生させる．歩行者の内，25%を2～3人のグループ歩行者とする．この実験では，希望歩行速度 $v_a^0 = [0.8\text{m/s}, 1.2\text{m/s}]$ とし，パラメータ A, B はビデオ観察より得た組み合わせからランダムで使用する．他パラメータは5.1節と同様のものを用いる．

実験の結果，誤認識率は約39%，誤拒否率は約62%であった．認識されたグループの内，約4割が誤ったグループであり，残りの6割は正しいグループであることが分かった．しかし，本来のグループの内正しく認識されていたグループは約4割となっている．本来のグループに比べ認識されたグループ数が少なく，正しいグループも認識されていないことが考えられる．

5.5. 予測モデルとグループ化

5.4節と同様の状況において，各モデルでグループ化と認識を取り入れた場合の違いを調査する．各モデルにおいて，約500人分の歩行速度を毎秒観測し，最大歩行速度の半分以上の速度変化が起こった歩行者数を調べる．但し，歩行者の発生確率は1人/1.6秒とする．

表3に各モデルでの、1秒間で最大歩行速度の半分以上の速度変化が発生した歩行者の割合を示す。従来のモデルと比べ、2種の位置予測モデルでは約2%急激な速度変化が起こった歩行者が減っていることが分かった。t検定を行った結果、従来のモデルと2種の位置予測モデル間では棄却率0.05にて有意差があると検定された。従って、提案モデルの方が、急激に速度を変化させるような不快な歩行をしている割合が減っていると言える。また実データを解析した結果、急激な速度変化が発生した割合は約20%となり、シミュレーション結果では大きくその値を上回っていることが分かった。

6. 考察

全ての歩行者が単独で歩行している状況において、従来のモデルに比べ、提案した詳細な位置予測モデルと簡単な位置予測モデルを用いた場合、他歩行者との対面時間が短くなった。提案モデルでは一見迂回をして時間を要する経路でも、将来を考えることにより他歩行者が最も少なく、早く目的地に到達可能な方向を選択できていると考える。また従来のモデルで見られた長時間の立ち止まり現象も解消されており、提案モデルではより実世界に近い歩行の再現が可能になったと考える。

提案したグループ化にて、2人グループの場合横に並んで歩行することを、3人グループの場合グループ中心に位置する歩行者が、端に位置する歩行者よりも後方を歩くことを確認した。これは2.2節で理想としたグループフォーメーションと等しく、高密度下における適切なグループ化現象を再現することができたと考える。また、グループサイズが大きいほど歩行速度が低下しており、歩行速度に関しても理想の状態を再現することが可能であると考えられる。

グループ歩行者と非グループ歩行者が接触する座標を変化させたところ、グループ中心より0.4m外側から接触した際には行動に変化が現れた。また、グループ回避を行わないモデルにてグループの間を通行していた場合、回避を取り入れたモデルでは位置によってグループ中心を通行する場合と、通行しない場合の2パターンが存在することを確認した。実世界の人間の挙動でも、グループ間の通行を回避可能である場合は回避し、回避が困難である場合はグループ間を通行する等、必ずしもグループ間を回避する行動をするとは限らない。そのため、実世界での歩行の様子を再現可能であると考えられる。

認識されたグループの半数以上が正しいグループであることが分かった。しかし同時に、本来のグループの多くはグループとして認識されていないことも分かった。グループとして認識されなかった原因として、歩行者同士の視線ベクトルのなす角の問題が考えられる。グループの視線は中心よりグループの平均速度分前方に設置していることから、誤ってグループでないと識別された歩行者は視線ベクトルのなす角が小さく、遠方を注視していた歩行者であると考えられる。これはグループ速度が速い場合に発生する現象であり、グループの注視位置や認識条件を変更することで改善が可能であると考えられる。

実世界の環境においてシミュレーションを行った結果、提案モデルでは従来のモデルに比べ急激な速度変化の発生した歩行者が減った。しかし、実際の歩行データを分析した結果、急激な速度変化が起きた歩行者はシミュレーションの3分の2程度であった。提案モデルではグループを回避しようとして速度低下を発生させていると考えられる。現在のモデルでは単独歩行者とグループ歩行者の回避を始めるタイミングが等しく、単独歩行者よりも大きな回避が必要なグループ歩行者の回避では、より早く回避を始めなければ不十分であると考えられる。従って、単独歩行者とグループ歩行者に対して同じ予測方法を適用している現在のモデルを改良し、異なる予測方法を用いるモデルを考案する必要がある。

7. まとめ

本論文では、将来の歩行者の位置と最適な進行方向予測を、シミュレーションにて行うモデルの提案を行った。また、グループ間に働く力と認識によってグループを回避するモデルを提案した。従来のモデルと比較した結果、提案モデルでは現実に近いスムーズなすれ違いが可能であることを確認した。また、グループ中心より後方への引力を追加することにより、理想とするグループフォーメーションでの歩行を再現することが可能になった。

実世界を再現したシミュレーションでは、実際の歩行データに比べ不快な歩行をしていた割合が多かった。単独歩行者とグループ歩行者の回避に同じ予測方法を用いていることが原因と考えられ、予測を改善し、より事前にグループを回避可能なモデルの考案が必要である。

文 献

- [1] Chamveha, I., Sugano, Y., Sato, Y., Sugimoto, A.: Social Group Discovery from Surveillance Videos: A Data-Driven Approach with Attention-Based Cues, BMVC, 2013.
- [2] Helbing, D.: Social Self-Organization: Agent-Based Simulations and Experiments to Study Emergent Social Behavior, Springer, Germany, 2012.
- [3] 伊織瞳, 藤田悟, 廣津登志夫: 歩行予測を取り入れた群衆の2相シミュレーション, マルチメディア, 分散, 協調モバイルシンポジウム(DICOMO2017), pp.263-269, 2017.
- [4] 伊織瞳, 藤田悟: シミュレーションによる2段階位置予測を用いた歩行者移動モデル, JAWS2018, 2018.
- [5] Johansson, A., Helbing, D., Shukla, P. K.: Specification of a Microscopic Pedestrian Model by Evolutionary Adjustment to Video Tracking Data, Advances in complex systems, Vol.10, pp.271-288, 2007.
- [6] Moussaïd, M., Perozo, N., Garnier, S., Helbing, D., Theraulaz, G., The Walking Behaviour of Pedestrian Social Groups and Its Impact on Crowd Dynamics, PLoS ONE, Vol.5, Issues 4, e10047, 2010.
- [7] Zanlungo, F., Bršić, D., Kanda, T.: Spatial-Size Scaling of Pedestrian Groups Under Growing Density Conditions, Physical review E, Vol. 91, No. 6, 062810, 2015.